

双边遥操作系统二阶滑模控制器设计*

王瑞奇¹, 冯玉光², 张文广¹, 顾文锦^{1*}

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院 兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

摘要: 一阶滑模控制方法由于需要大的带宽和高频切换信号, 以及处理系统的参数不确定和强非线性, 在双边遥操作的工程应用中难以推广。针对上述问题, 将二阶滑模控制和阻抗控制联合起来, 设计了大时延下的控制结构, 并利用全维状态观测器对主从机械臂的加速度、速度进行了观测, 实现了双边遥操作系统的鲁棒平滑控制; 在此基础上, 分析了加入观测器后整个系统的闭环稳定性, 给出了稳定性定理, 并用李雅普诺夫函数方法进行了证明; 最后分两种时延情况对闭环系统进行了仿真。实验结果表明, 该方法可以使系统具有了较好的稳定性能。

关键词: 双边控制; 遥操作; 二阶滑模控制; 大时延

中图分类号: TP24; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0469-05

Second order sliding mode controller design for bilateral teleoperation system

WANG Rui-qi¹, FENG Yu-guang², ZHANG Wen-guang¹, GU Wen-jin¹

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Department of Enginry Science and Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: First order sliding mode control needs a large bandwidth and high frequency switch to deal with parameteric uncertainties and hard nonlinearities. This requirement prevented the method form widely accepted in bilateral teleoperation applications. On this basis, the second order sliding mode control and impedance control were combined, the control structure under the large time delay was designed. The complete order observers were proposed to avoid measurement of acceleration, the robustness and fast tracking without chattering were realized. After the analysis of stabilization, Lyapunov function method was used to prove the stabilization theorem. Finally, the closed system were evaluated on the two different time delay. Experimental results show that this approach is valid and has encouraging stabilization performance.

Key words: bilateral control; teleoperation; second order sliding mode control; large time delay

0 引 言

在机器人的时延遥操作领域, 涉及到很多参数不确定和非线性问题, 所以滑模控制的应用十分广泛。然而当从手和环境硬接触时, 从手控制器不能有颤振,

因此一阶滑模控制的适用性就受到了局限。同时, 高阶滑模控制的研究受到了关注。

过去二十多年, 学术界提出了许多时延遥操作控制方法, 但是大多数都是对应线性系统^[1]。Kim 等用力反馈和共享柔顺控制来提高时延遥操作系统的

收稿日期: 2011-09-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)重点资助项目(2007AA704339)

作者简介: 王瑞奇(1980-), 男, 河南辉县人, 博士研究生, 主要从事面向在轨服务的遥操作系统双边控制、空间机器人路径规划方面的研究。

E-mail: richkey1980@gmail.com

通信联系人: 顾文锦, 男, 教授, 博士生导师。 E-mail: wenjing11@gmail.com

性能^[2]。传感器测得的力先通过低通滤波器滤波,然后送给位置误差控制信号,这样可以柔顺碰撞力。然后, Arcara 等证明大时延条件下,此种方法是不稳定的^[3]。如果能在控制器增益、缩放因子和跟踪性能间建立一个平衡,可以保证稳定性。Anderson 等基于散射和无源的方法实现遥操作系统的稳定控制^[4]。Niemeyer 等通过波变量的概念^[5],扩展了无源的方法。然而,实际上,若机械结构是非理想的,执行机构和传感器可能干扰无源性^[6-7],使得这些方法在使用中有诸多限制。Buttolo 等提出了一阶滑模控制器^[8],来提高位置跟踪和应对参数不确定。不过,即使是小的时延也会使遥操作系统不稳定,而且,滑模控制引入了高频信号,这使其不适合于实际的硬接触实验。Park 等提出了主手阻抗控制,从手一阶滑模控制,滑模条件可以设置成时延无关的^[9]。因此,这种方法在常时延和有界变时延情况下可以获得鲁棒稳定性^[10]。然而,当接触硬环境时,该方法很容易导致不稳定。为解决这个问题,他们进一步提出了从手基于滑模的阻抗控制^[11-12]。其中,符号函数用饱和函数来代替,以降低颤振。

尽管一阶滑模有鲁棒性,但是由于颤振的存在,很难应用于遥操作控制。因此,如何将滑模控制的鲁棒性和平滑跟踪结合起来,是非常值得研究的。

高阶滑模控制可有效避免颤振。基于此,本研究将二阶滑模和阻抗控制联合起来,并利用线性观测器,对加速度分量进行观测,为双边遥操作系统提供一种平滑的控制方法。

1 遥操作系统模型

遥操作系统是指操作者对主机械手进行操作,远端从机械手跟踪主机械手的运动,从而完成远程复杂或危险环境下的任务。而双边遥操作系统除此之外,还要求主手操作者在操作时有临场感,也即,要求主机械手反作用于操作者的力能够跟踪环境反作用于从机械手的力。该力从从端反馈到主端的过程称为从端的力反馈。

单自由度时,主、从手的方程如下:

$$M_m \dot{v}_m + B_m v_m = f_h + u_m \quad (1)$$

$$M_s \dot{v}_s + B_s v_s = u_s - f_e \quad (2)$$

式中: v_i, \dot{v}_i —表示速度和加速度; u_i —控制力; M_i, B_i —相应的质量和阻尼系数; i —主、从手, $i=m, s$; f_h —操作者施加于主手的力; f_e —环境作用于从手的力。

主、从手模型示意图如图 1 所示。

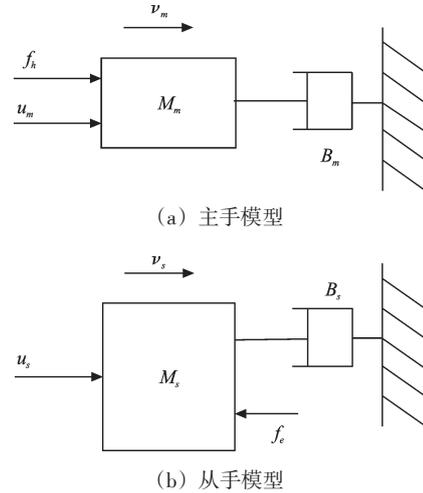


图 1 主、从手模型示意图

2 控制器设计

2.1 主手控制器设计

本研究采用下面的主手控制结构:

$$u_m = -f_h + B_m v_m + \frac{M_m}{M_{md}} \times (f_h - k_f f_e^l - B_{md} v_m) \quad (3)$$

式中: M_{md}, B_{md} —期望的惯性, 阻尼参数 ($B_{md} > 0$), 它们可以组成期望的阻抗。 $f_e^l = f_e(t - T)$, T —通讯通道的时延, 上标 l —时延信号。为了简便, 本研究假设前向和反向时延是一样的。

将式(3)代入式(1), 可得闭环阻抗误差方程:

$$M_{md} \dot{v}_m + B_{md} v_m = f_h - k_f f_e^l \quad (4)$$

借此, 主手控制器在主手速度与操作力和时延接触力的线性组合间, 建立了一个期望阻抗动态。在该设计过程中, 本研究不考虑弹性参数。其原因是操作者与主手刚性机械臂之间的弹性形变可以忽略。

2.2 从手控制器设计

本研究在设计从手时, 考虑到从手机械臂与各种复杂环境之间的接触, 此时, 需要考虑弹性参数。要求可以根据环境接触力进行调节, 并具有鲁棒性, 本研究利用二阶滑模方法来设计。考虑从手期望阻抗:

$$M_{sd} \ddot{x}_s + B_{sd} \dot{x}_s + K_{sd} x_s = -f_e \quad (5)$$

式中: M_{sd}, B_{sd}, K_{sd} —期望的惯性, 阻尼和弹性参数 ($K_{sd} > 0$); $\ddot{x}_s, \dot{x}_s, x_s$ —从手跟踪的加速度误差、速度误差和位置误差, $\ddot{x}_s = \dot{v}_s - k_p \dot{v}_m^l, \dot{x}_s = v_s - k_p v_m^l, x_s = \int_0^t v_s - k_p v_m^l dt$ 。

由于本研究希望闭环系统满足式(5), 可选择滑模面为:

$$S = M_{sd} \ddot{x}_s + B_{sd} \dot{x}_s + K_{sd} x_s + f_e \quad (6)$$

本研究定义扩展误差变量如下:

$$\Gamma = \frac{1}{M_{sd}} \int_0^t S(\tau) d\tau + \frac{1}{M_{sd}} C_s \int_0^t \int_0^\sigma \text{sign}(S(\tau)) d\tau d\sigma \quad (7)$$

式中: C_s —滑模增益, $C_s > 0$ 。

将式(6)代入式(7),可得:

$$\Gamma = \dot{\hat{x}}_s + \frac{B_{sd}}{M_{sd}} \bar{x}_s + \frac{1}{M_{sd}} \int_0^t [K_{sd} \bar{x}_s + f_e] d\tau + \frac{C_s}{M_{sd}} \int_0^t \int_0^\sigma \text{sign}(S(\tau)) d\tau d\sigma \quad (8)$$

考虑下面的从手控制器 u_s :

$$u_s = -\frac{M_s}{M_{sd}} (B_{sd} \dot{\hat{x}}_s + K_{sd} \bar{x}_s + f_e) - \frac{M_s}{M_{sd}} C_s \int_0^t \text{sign}(S(\tau)) d\tau + \frac{M_s}{M_{sd}} k_p (f_h^l - k_f f_e^{2l} - B_{md} \dot{x}_m^l - K_{md} x_m^l) + f_e + B_s \dot{x}_s - K_g \Gamma \quad (9)$$

式中: $f_e^{2l} = f_e(t-2T)$, $K_g > 0$, $\text{sign}(\cdot)$ —符号函数。颤振消除通过对 $\text{sign}(I_e)$ 积分来实现。高频信号对于机电系统是非常有害的,所以二阶滑模相对一阶滑模,是一个比较好的选择。 $K_g \Gamma$ 用来获得稳定性。需要注意的是,因为 S 中包含有加速度,式(8)需要测量加速度。为了解决此问题,笔者在主、从手分别设计了线性观测器,对加速度和速度进行估计。

3 观测器设计

本研究分别在主从手加入全维线性观测器。将其表述为状态空间形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_i \mathbf{u}_i \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i \end{cases} \quad (10)$$

式中:系统状态 $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^n$, \mathbf{y}_i —测量输出, \mathbf{u}_i —控制输入, $\mathbf{A}_i \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{b}_i \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{C}_i \in \mathbf{R}^{m \times n}$, $i=m$ 表示主手, $i=s$ 表示从手。状态 x_i 可以用线性观测器观测。全维线性观测器设计如下:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_i = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{b}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{L}_i (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}_i) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}_i \quad (12)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_i$ —系统状态估计, $\hat{\mathbf{x}}_i \in \mathbf{R}^n$; $\hat{\mathbf{y}}_i$ —输出估计 ($i=m$ 表示主手, $i=s$ 表示从手); \mathbf{L}_i —观测器增益向量, $\mathbf{L}_i \in \mathbf{R}^n$ 。

4 闭环系统稳定性分析

本研究用估计的状态代替系统状态后,分析系统的稳定性。

将式(3)中的系统状态用估计的状态代替,并联合式(1)的主手方程,可得主手的闭环动态:

$$M_{md} \ddot{x}_m + B_{md} \dot{x}_m = f_h - k_f f_e^l + \left[B_{md} - \frac{M_{md}}{M_m} B_m \right] e_{m2} \quad (13)$$

其中: $e_{m2} = \dot{x} - \hat{x}$

如果 $e_{m2} \rightarrow 0$, 那么式(13)变为式(4)。本研究通过选择合适的 M_{md} , B_{md} , 可得到期望的阻抗。

对于从手,将滑模面 S 中的状态换为估计状态 \hat{x}_s :

$$\hat{S} = M_{sd} \ddot{\hat{x}}_s + B_{sd} \dot{\hat{x}}_s + K_{sd} \bar{x}_s + f_e \quad (14)$$

其中:

$$\ddot{\hat{x}}_s = \ddot{x}_s - k_p \dot{x}_m^l, \quad \dot{\hat{x}}_s = \dot{x}_s - k_p x_m^l$$

上式分别是加速度和速度的观测误差。因此扩展误差变量的估计可表示为:

$$\begin{aligned} \hat{\Gamma} &= \frac{1}{M_{sd}} \left[\int_0^t \hat{S}(\tau) d\tau + C_s \int_0^t \int_0^\sigma \text{sign}(\hat{S}(\tau)) d\tau \right] = \\ &\dot{\hat{x}}_s + \frac{B_{sd}}{M_{sd}} \bar{x}_s + \frac{1}{M_{sd}} \int_0^t [K_{sd} \bar{x}_s + f_e] d\tau + \\ &\frac{C_s}{M_{sd}} \int_0^t \int_0^\sigma \text{sign}(\hat{S}(\tau)) d\tau d\sigma \end{aligned} \quad (15)$$

和主手类似,本研究将 \hat{x}_s 代入从手控制器式(9),替换掉其中的 x_s , 可得:

$$u_s = -\frac{M_s}{M_{sd}} (B_{sd} \dot{\hat{x}}_s + K_{sd} \bar{x}_s + f_e) - \frac{M_s}{M_{sd}} C_s \int_0^t \text{sign}(\hat{S}(\tau)) d\tau + \frac{M_s}{M_{md}} k_p (f_h^l - k_f f_e^{2l} - B_{md} \dot{x}_m^l - K_{md} x_m^l) + f_e + B_s \dot{\hat{x}}_s - K_g \hat{\Gamma} \quad (16)$$

本研究将式(16)代入式(2),并联合式(13),可以获得下面的从手闭环系统描述:

$$\begin{aligned} M_s (\ddot{x}_s - k_p \dot{x}_m^l) + \frac{M_s}{M_{sd}} B_{sd} (\dot{x}_s - k_p x_m^l) + \\ \frac{M_s}{M_{sd}} K_{sd} \bar{x}_s + K_g \hat{\Gamma} \\ \frac{M_s}{M_{sd}} \left[f_e + C_s \int_0^t \text{sign}(\hat{S}(\tau)) d\tau \right] + \\ \left[\frac{M_s}{M_{sd}} B_{sd} - B_s \right] e_{s2} = \\ \left[\frac{M_s}{M_{md}} B_{md} k_p - \frac{M_s}{M_{sd}} B_{sd} k_p \right] e_{m2} + \\ \frac{M_s}{M_{md}} k_p \left[B_{md} - \frac{M_{md}}{M_m} B_m \right] e_{m2}^l - \end{aligned} \quad (17)$$

方程两边做适当的变换后,可以得到:

$$\dot{\hat{\Gamma}} + \alpha \hat{\Gamma} = a_1 e_s + a_2 e_m + a_3 e_m^l \quad (18)$$

其中:

$$\alpha = K_g / M_s, \quad a_1 = v_1 + v_4 \lambda_s, \quad a_2 = v_2, \quad a_3 = v_3 + v_5 \lambda_{ml} \\ v_1 = -\frac{B_s}{M_s}, \quad v_2 = -\frac{B_{md}}{M_{md}} k_p - \frac{B_{sd}}{M_{sd}} k_p,$$

$$v_3 = -\frac{B_{sd}}{M_{sd}}k_p - \frac{k_p}{M_{md}}\left(B_{md} - \frac{M_{md}}{M_m}B_m\right),$$

$$v_4 = -1, v_5 = k_p.$$

如果 e_s, e_m, e_m^l 趋向于零, 则 $\hat{\Gamma} \rightarrow 0$, 那么 $\hat{S} \rightarrow 0$.

定理: 适当选取正定反馈增益 K_g, K_i , 在控制律式(3,9)和观测器式(11,12)的作用下, 系统的误差动态式(18)是渐近稳定的。

证明:

选取下面的李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2}\hat{\Gamma}^2 + \frac{1}{2}e_s^2 + \frac{1}{2}e_m^2 + \frac{1}{2}(e_m^l)^2 \quad (19)$$

对上式求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \hat{\Gamma}\dot{\hat{\Gamma}} + e_s\dot{e}_s + e_m\dot{e}_m + e_m^l\dot{e}_m^l \leq \\ & -\alpha\hat{\Gamma}^2 + \hat{\Gamma}a_1e_s + \hat{\Gamma}a_2e_m + \hat{\Gamma}a_3e_m^l - \\ & \lambda_s e_s^2 - \lambda_m e_m^2 - \lambda_{ml}(e_m^l)^2 \leq \\ & -\alpha\hat{\Gamma}^2 + a_1|\hat{\Gamma}||e_s| + a_2|\hat{\Gamma}||e_m| + a_3|\hat{\Gamma}||e_m^l| - \\ & \lambda_s e_s^2 - \lambda_m e_m^2 - \lambda_{ml}(e_m^l)^2 \end{aligned} \quad (20)$$

可以适当选取, 考虑:

$$\alpha = \delta + \frac{a_1^2}{4\lambda_s} + \frac{a_2^2}{4\lambda_m} + \frac{a_3^2}{4\lambda_{ml}}$$

从而有:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\delta\hat{\Gamma}^2 - \frac{a_1^2}{4\lambda_s}\hat{\Gamma}^2 + a_1|\hat{\Gamma}||e_s| - \lambda_s e_s^2 - \\ & \frac{a_2^2}{4\lambda_m}\hat{\Gamma}^2 + a_2|\hat{\Gamma}||e_m| - \lambda_m e_m^2 - \\ & \frac{a_3^2}{4\lambda_{ml}}\hat{\Gamma}^2 + a_3|\hat{\Gamma}||e_m^l| - \lambda_{ml}(e_m^l)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

故可得:

$$\dot{V} \leq -\delta\hat{\Gamma}^2$$

因此, 系统是全局渐近稳定的。

5 仿真实验

仿真参数如下:

主手: $M_m = 1.5 \text{ kg}, B_m = 1 \text{ N} \cdot \text{s/m};$

从手: $M_s = 2 \text{ kg}, B_s = 1.5 \text{ N} \cdot \text{s/m};$

环境: $k_e = 100 \text{ N/m}, b_e = (1 + x_s) \text{ N} \cdot \text{s/m};$

从手控制器增益 $K_g = 25, C_s = 0.1$, 缩放因子 $k_p = 1, k_f = 1;$

观测器主手的特征根为 $[-50 \ -50]$, 从手的特征根为 $[-50 \ -50];$

$$L_m = [80 \ 410]^T, L_s = [60 \ 250]^T;$$

主手期望的阻抗参数 $M_{md} = 2, B_{md} = 0.5;$

从手期望的阻抗参数 $M_{sd} = 3, B_{sd} = 1.2, K_{sd} = 15.$

在 $T = 1 \text{ s}$ 时和 $T = 3 \text{ s}$ 时, 本研究进行了仿真实验。当 $T = 1 \text{ s}$ 时, 仿真结果如图2、图3所示。

时延 1 s 时的主、从手位移跟踪曲线如图2所示。横轴为时间, 纵轴为主、从手位移, 实线表示主手的实时位移, 点划线表示从手的实时位移。从仿真结果可以看出, 随着仿真进行, 从手能够较好地跟踪主手运动。相应力跟踪曲线如图3所示。

当 $T = 3 \text{ s}$ 时, 仿真结果如图4、图5所示。

时延 3 s 时的主、从手位移跟踪曲线如图4所示。纵横轴定义与图2相同。从仿真结果可以看出, 随着仿真进行, 从手也能够较好地跟踪主手运动。相应力跟踪曲线如图5所示。

与时延为 1 s 时相比, 当时延为 3 s 时, 由于时延的增大, 主从手的位移和力跟踪响应曲线之间的动态误差会变大, 不过最后静态误差都会趋于稳定。

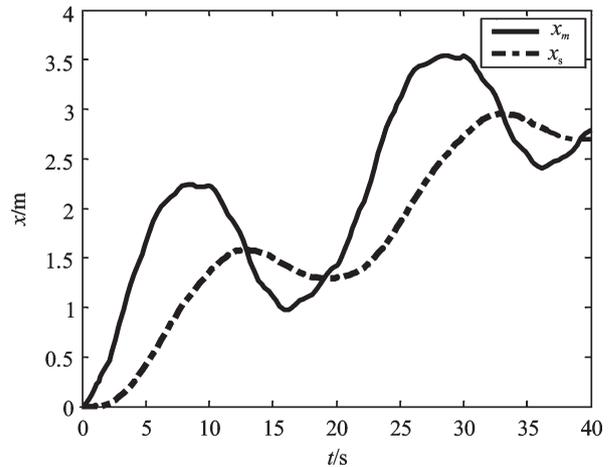


图2 主、从手位移跟踪曲线

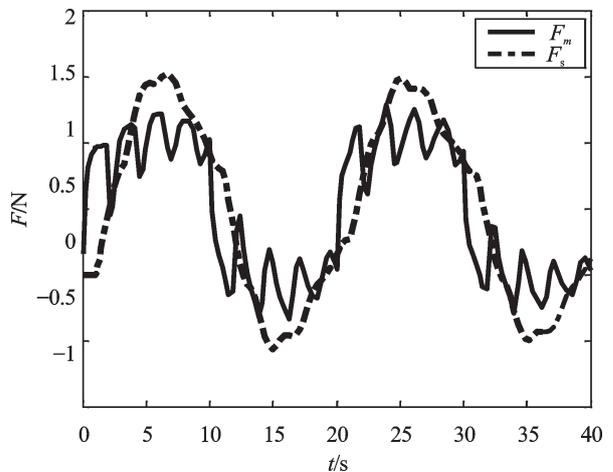


图3 主、从手力跟踪曲线

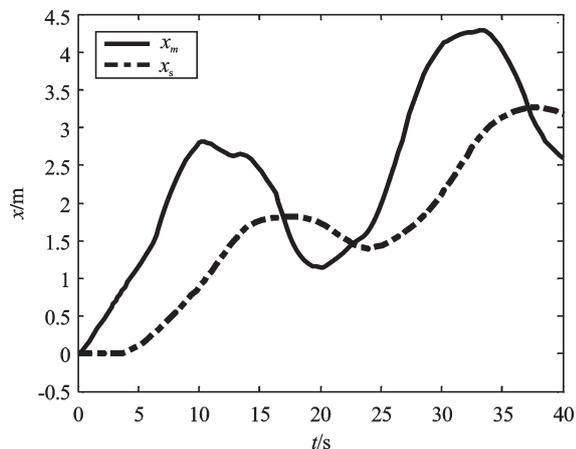


图4 主、从手位移跟踪曲线

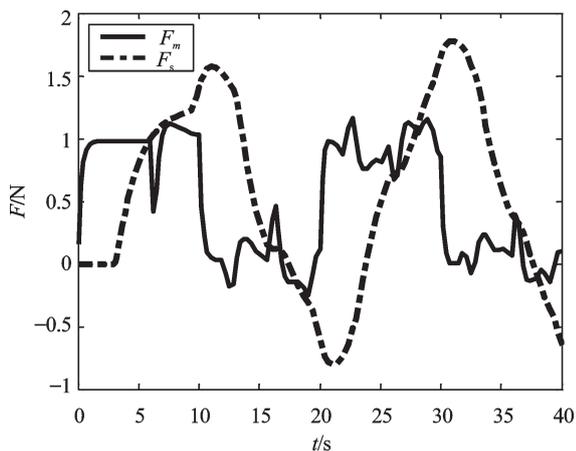


图5 主、从手力跟踪曲线

6 结束语

尽管一阶滑模有鲁棒性,但是由于颤振的存在,很难应用于遥操作双边控制。高阶滑模控制可有效避免颤振,将滑模控制的鲁棒性和阻抗控制的平滑跟踪有机结合起来。

采用二阶滑模控制时,控制信号中包含有加速度分量,所以需要测量加速度。为了解决此问题,笔者在主、从手分别设计了全维线性观测器,对加速度和速度进行了估计。然后,用估计的状态代替系统状态,经过推导变换,并结合李雅普诺夫函数方法,分析了系统的闭环稳定性。

参考文献(References):

- [1] 王永,谢圆,周建亮. 空间机器人大时延遥操作技术研究综述[J]. 宇航学报,2010,31(2): 299-306.
- [2] KIM W S, HANNAFORD B. Force reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay[J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 1992,8(2):176-185.
- [3] ARCARA P, MELCHIORRI C. Control schemes for teleoperation with time delay: comparative study [J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2002(38):49-64.
- [4] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperation with time delay [J]. **IEEE Transaction on Automation Control**, 1989,34(5): 494-501.
- [5] NIEMEYER G, SLOTINE J J E. Stable adaptive teleoperation [J]. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 1991, 16(1):152-162.
- [6] 邓乐,赵丁选. 一种新的力觉临场感遥操作机器人系统的控制方法[J]. 机电工程,2005,22(7): 26-29.
- [7] WANG R Q, XIA C J, GU W J, et al Fuzzy Singular Perturbed Model and Stability Analysis of Bilateral Teleoperation System [C] //Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, 2011: 3664-3668.
- [8] BUTTOLO P, BRAATHEN P, HANNAFORD B. Sliding control of force reflecting teleoperation: preliminary studies [J]. **PRE-SENCE**, 1994,3(2):158-172.
- [9] PARK J H, CHO H C. Sliding mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay [C] //The IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta, USA, 1999:311-317.
- [10] 黄金梭,陈开强. 基于VB的工业机器人PLC控制系统 [J]. 轻工机械,2010,28(3):65-68-72.
- [11] CHO H C, PARK J H, KIM K, et al. Sliding Mode based Impedance Controller for Bilateral Teleoperation under Varying Time Delay [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001:1025-1030.
- [12] CHO H C, PARK J H. Stable bilateral teleoperation under a time delay using a robust impedance control [J]. **Mechanics**, 2005(15):611-625.

[编辑:张翔]